

Schutz von Gewässern und Grundwasser durch dichte Betonbauteile

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

**Bericht erstattet von
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. K. Kordina
Dr.-Ing. H.-H. Osteroth
Dipl.-Min. W. Schwick**

Braunschweig im Juli 1989

Das Forschungsvorhaben wurde vom Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst aus Mitteln des Zahlenlottos gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens.....	1
2 Übersicht zu den Anforderungen an dichten Beton.....	3
3 Berechnung und Herstellung dichter Betonbauteile.....	6
4 Eigene Versuche zur Entwicklung chemisch widerstands- fähiger Betone.....	12
4.1 Allgemeines.....	12
4.2 Rezepturen der untersuchten Betonmischungen.....	12
4.2.1 Mischung mit Silicastaub.....	12
4.2.2 Mischung mit Flugasche.....	13
4.2.3 Mischung mit Hochofenzement und Flugasche.....	13
4.2.4 Vergleichsmischung ohne Betonzusatzstoffe.....	14
4.3 Herstellung von Versuchskörpern.....	14
4.4 Untersuchungsprogramm.....	16
5 Versuchsergebnisse.....	18
5.1 Druckfestigkeit der untersuchten Mischungen.....	18
5.2 Wassereindringung.....	20
5.3 Prüfung der chemischen Beständigkeit.....	22
5.4 Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Beanspru- chungen.....	29
5.5 Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie und der Differentialthermoanalyse.....	30
5.6 Frühschwinden.....	34
6 Zusammenfassung und Ausblick auf weitere notwendige For- schungsarbeiten.....	35
7 Literaturverzeichnis.....	38

1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Dem vorbeugenden Gewässerschutz wird zur Erhaltung einwandfreier Wasserqualitäten eine hohe Bedeutung beigemessen. Nicht erst seit den größeren Unfällen, die im Jahre 1986 zeitweise zu erheblichen Verschmutzungen des Rheins geführt haben, ist dabei auch an allen Bauteilen eine hohe Dichtigkeit zu gewährleisten, die nur zeitlich begrenzt oder bei unplanmäßigen Schadensfällen wassergefährdenden Stoffen widerstehen müssen. Da bei betriebsbedingten Leckagen, bei Überfüllungen, Undichtigkeiten an Rohrleitungen oder Schadensfällen an Behältern und Tankfahrzeugen auch sonst nicht mit Chemikalien beaufschlagte Bodenflächen in Produktionshallen, Lagerräumen, Auffangvorrichtungen oder Abfüllplätzen von wassergefährdenden Flüssigkeiten beansprucht werden, enthält z. B. das Wasserhaushaltsgesetz (§ 19 g-1) entsprechende Bestimmungen für den vorbeugenden Gewässerschutz.

Die dort gestellten hohen Anforderungen an Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen umfassen als wesentlichen Bestandteil auch Aussagen zur Dichtheit und Widerstandsfähigkeit der Werkstoffe gegenüber den gelagerten, abzufüllenden oder bei der Produktion verwendeten Stoffen. Danach dürfen wassergefährdende Flüssigkeiten weder oberirdisch in ein Gewässer abfließen oder im Erdboden versickern, noch über die angrenzende Bodenfläche hindurch in das Grundwasser gelangen. Zur Abdichtung solcher Bodenflächen werden heute vorwiegend Kunststoffbeschichtungen und -auskleidungen oder Stahlblechwannen verwendet. Insbesondere wegen der oft hohen mechanischen Beanspruchung, z. B. aus dem Befahren mit LKW's oder Gabelstaplern, muß jedoch die Dauerhaftigkeit derartiger Abdichtungen häufig als unzureichend eingestuft werden.

Die vorliegende Forschungsarbeit soll dazu beitragen, widerstandsfähige Stahlbetonoberflächen zu entwickeln, damit bei kurzzeitiger Einwirkung von Chemikalien, denen das Betongefüge einen begrenzten Widerstand entgegensetzen kann, auf zusätzliche Dichtungsmaßnahmen verzichtet werden kann. Stahlbetonoberflächen erfüllen für diese Zielsetzung insofern wich-

tige Voraussetzungen als sie für zahlreiche, verschiedenartige mechanische Beanspruchungen zuverlässig bemessen werden können und Beton darüberhinaus als eingeführter Baustoff einfach herstellbar und verfügbar ist. Neben hoher Funktionstüchtigkeit und Betriebssicherheit können damit bei Verwendung von Stahlbetonbauteilen auch instandhaltungsarme sowie im Betrieb sparsame Konstruktionen erstellt werden.

Um die Bedeutung des Forschungsthemas aufzuzeigen, wird nachfolgend noch auf einige Anwendungsbereiche bedeutender Industriezweige hingewiesen, bei denen die Verwendung von Chemikalien den Einsatz dichter Betonoberflächen als vorteilhaft erscheinen läßt, weil damit zusätzliche Abdichtungen weniger aufwendig ausgeführt werden müssen oder ganz entfallen können:

- Metallindustrie
Entfetten, Aufbringen eines Korrosionsschutzes, Reinigen, Lackieren
- Chemische Industrie
Produktion und Lagerung von Chemikalien
- Computer Industrie
Herstellung elektronischer Bauteile
- Druckindustrie
Druckplatten- und Druckwalzenreinigung
- Lebensmittelindustrie
Herstellung von Aromastoffen, Reinigung der Betriebsstätten
- Papier- und Zellstoffindustrie
Herstellung und Einfärben von Papier

Das Forschungsvorhaben wurde vom Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst aus Mitteln des Zahlenlottos gefördert. (Zuweisungsverfügung vom 03.07.1987).

2 Übersicht zu den Anforderungen an dichten Beton

An Beton, der nach den üblichen Regeln des Stahl- oder Spannbetonbaus für die Herstellung tragender Bauteile verwendet wird, sind üblicherweise im Hinblick auf die Dichtigkeit der Oberflächen keine gesonderten Anforderungen zu stellen. Allenfalls ist in den Fällen auf Verformungs- und Durchbiegungsbegrenzungen zu achten, bei denen die Verträglichkeit mit einer zusätzlich aufgebrachten Abdichtung nicht gefährdet werden soll. Umfassendere Anforderungen sind dagegen zu erfüllen, wenn der Beton neben der tragenden Funktion auch die Abdichtung sicherstellen soll. Dazu zeigt die folgende Übersicht die Zielsetzungen möglicher Anforderungen:

- Widerstand gegen Chemikalien
gasförmig, flüssig, fest
anorganisch, organisch
- Widerstand gegen mechanische Belastungen unter Betriebsbedingungen aus
Zwang (Temperatur, Schwinden, Setzungen)
impulsartige Stoßbelastungen (Absetzen von Lasten, Fahrzeuge)
Explosionen
- Undurchlässigkeit gegenüber Flüssigkeiten oder Gasen
Kapillarität
Permeation
Diffusion
- Widerstand bei Störfällen, z. B. gegenüber thermischen Beanspruchungen im Brandfall

Um die aufgeführten Anforderungen erfüllen zu können, sind bereits in der Entwurfsphase die folgenden baustofflichen und konstruktiven Planungsgrößen gezielt festzulegen:

- Begrenzung der Rißbildung und Rißbreiten
- Rißabdichtung, falls Risse akzeptiert werden

- Wahl einer optimalen Betonzusammensetzung im Hinblick auf die Dichtigkeitsforderungen
- Maßnahmen zur Stoß- und Abriebfestigkeit der Oberflächen
- Angaben für eine ergänzende Oberflächenversiegelung

Über die planerische Festlegung der Anforderungen für eine hohe Widerstandsfähigkeit hinausgehend ist, ebenso wie bei statisch konstruktiven Bauteilanforderungen, natürlich auch bei Forderungen, die im Rahmen des vorbeugenden Gewässerschutzes im Hinblick auf eine dauerhafte Dichtung gestellt werden, nachzuweisen, daß die Planungsvorgaben vom fertiggestellten Bauwerk tatsächlich erfüllt werden. Damit wird deutlich, daß der Weiterentwicklung zerstörungsfreier Prüfverfahren für derartige Aufgabenstellungen zukünftig besondere Bedeutung beizumessen ist, weil die Dichtigkeit bei der Überprüfung nicht gefährdet werden darf.

Zu den genannten Planungsgrößen der Begrenzung der Rißbildung und Rißbreiten sowie der Rißabdichtung liegen mittlerweile bereits umfangreiche Forschungsergebnisse und baupraktisch erprobte Bemessungsansätze vor, so daß die für ein Bauwerk definierten Anforderungen auch hinsichtlich der Rißbildung zuverlässig erfüllt werden können. Insbesondere die Neuregelung des Nachweises zur Beschränkung der Rißbreite unter Gebrauchslast in der Neufassung von DIN 1045, Ausgabe Juli 1988, stellt sicher, daß bei Beachtung der dort angegebenen Konstruktionsregeln eine hohe Sicherheit gegen klaffende Risse gegeben ist. Weiterführende Maßnahmen für Bauteile mit erhöhten Anforderungen an die Dichtheit wird ein vom Deutschen Beton-Verein zur Zeit vorbereitetes Merkblatt /16/ enthalten. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit können Rißbreiten $< 0,2$ mm im allgemeinen als unschädlich angesehen werden. Dagegen können Trennrisse bereits bei kleinen Rißbreiten zur Undichtigkeit eines Stahlbetonbauteils führen. Neuere Untersuchungen an der RWTH Aachen /17/ zeigen, daß auch Trennrisse mit Breiten von nur 0,1 mm nicht als wasserdicht bezeichnet werden können. Allerdings bewirkt langfristig bei Trennrissen $\leq 0,2$ mm ein Prozeß der Selbstheilung eine Verringerung der

Durchlässigkeit, was jedoch im Rahmen der hier gestellten Frage nicht von vorrangiger Bedeutung sein dürfte, weil kurzfristig ein Durchtritt umweltschädlicher Flüssigkeit nicht verhindert wird.

Für den hier besonders interessierenden Fall einer kurzzeitigen Flüssigkeitsbeanspruchung sind im Hinblick auf die angestrebte Dichtigkeit Trennrisse zu vermeiden. Dazu bietet sich insbesondere die Anwendung der Vorspannung an. Eine mäßige, konstruktive Vorspannung von ca. 1,0 bis 1,5 MN/m² zentrischer Druckspannung bei dünnen Platten bietet im allgemeinen die Gewähr dafür, daß im Gebrauchszustand eine ungerissene Betondruckzone bestehen bleibt, die die Dichtigkeit des Baukörpers sicherstellt. Der Einsatz von dauerkorrosionsschutzten Litzenspanngliedern ohne Verbund stellt dabei eine konstruktiv einfache und kostengünstige Lösung dar.

In Ergänzung zu den angesprochenen konstruktiven Anforderungen soll die vorliegende Arbeit vor allem zur Entwicklung einer optimalen Zusammensetzung solcher Betone beitragen, die gegenüber der Einwirkung wassergefährdender Stoffe infolge einer dichten Oberfläche eine so hohe Widerstandsfähigkeit aufweisen, daß Auffangwannen und -räume sowie Bodenflächen ohne weitere zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen hergestellt werden können. Um die Randbedingungen und Voraussetzungen für diese Entwicklungen aufzuzeigen, werden im folgenden Abschnitt 3 zunächst einige Anmerkungen zur Konstruktion und Berechnung dichter Bauteile zusammengestellt. Da für den Schutz von Gewässern und Grundwasser vor allem an die Bodenplatte hohe Anforderungen gestellt werden, wird auf die Belange dieser Bauteile besonders hingewiesen.

3 Berechnung und Herstellung dichter Betonbauteile

Bei der Konzeption dichter Betonbauteile sind mögliche Einflüsse während der folgenden drei Phasen zu beachten:

- a) Betonierphase, Verhalten des frischen Betons
- b) Bauzustand
- c) Gebrauchszustand während der Nutzungsdauer

Während der Betonierphase können nachteilige Gefügeveränderungen oder Rißbildungen aus einem Temperaturgefälle infolge der Hydratation und aus dem Frühschwinden des Betons, das auch als "plastisches Schwinden" oder "Bluten" bezeichnet wird, entstehen. Folgende Einflußgrößen bestimmen die Größenordnung der Abbindewärme und des Frühschwindens:

- Zementart und Zementanteil

Insbesondere bei massigen Bauteilen sollten Zemente mit geringer Wärmeentwicklung, z. B. Hochofenzemente oder langsam erhärtende Zemente eingesetzt werden. Mit geringerem Zementgehalt nimmt auch die Wärmeentwicklung ab.

- Wahl eines niedrigen W/Z-Wertes

Ein geeignetes Verfahren zur Erzielung niedriger W/Z-Werte ist z. B. die Vakuumbehandlung der Betonoberflächen /8,13/.

- Umweltbedingungen

Extreme Temperaturen und Temperaturunterschiede sowie intensive Sonnenstrahlung und hohe Windgeschwindigkeiten fördern die Neigung zur Rißbildung bereits während des Betonierens.

- Nachbehandlung

Insbesondere beim Einsatz von Betonzusatzmitteln, z.B. Verzögerer, ist einer ausreichend langen Nachverdichtung Bedeutung beizumessen

Nach der Erhärtung des Betons können im Bauzustand folgende Beanspruchungen auftreten:

- Zwang infolge Schwinden und Temperatur

- Lasten aus Verkehr und aufgehenden Bauteilen

Zur Begrenzung der Schwindbeanspruchungen werden großformatige Bauteile in der Regel abschnittsweise versetzt hergestellt, so daß zumindest die Zwangbeanspruchungen aus der abfließenden Hydratationswärme und dem Schwindanteil unmittelbar nach dem Erhärten des Betons deutlich vermindert werden können. Vor allem in Wänden werden oftmals Sollbruchstellen angeordnet, die erst nach dem Abklingen der Schwindverformungen endgültig geschlossen werden. Bild 3.1 zeigt ein Beispiel, bei dem die in der Sollbruchstelle konzentrierten Risse mittels der vorbereiteten Injektionsschläuche nachträglich verpreßt werden.

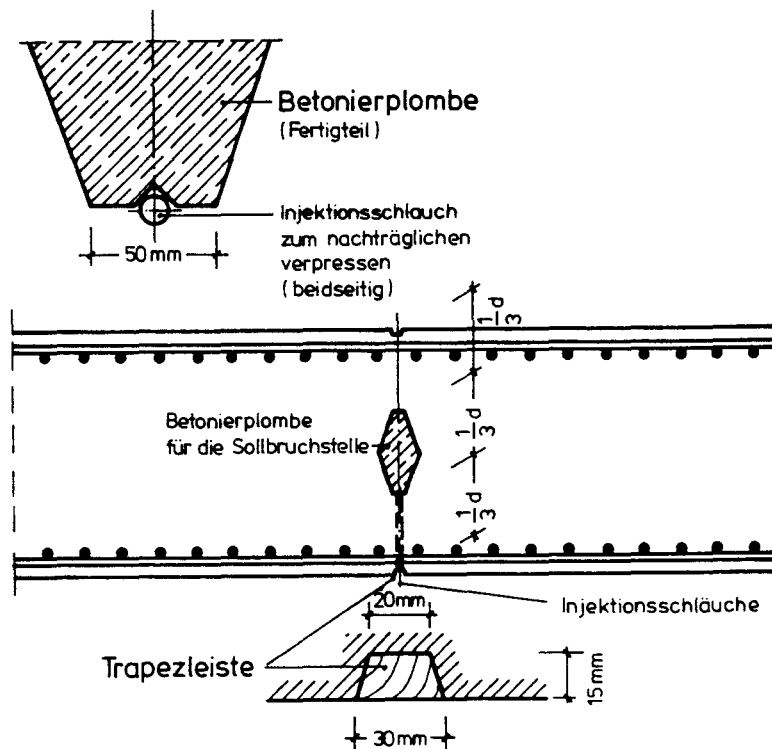


Bild 3.1: Ausbildung einer Sollbruchstelle mittels eines Betonfertigteils, das die Lage des Risses sichert und ein nachträgliches Verpressen des entstehenden Risses erlaubt

Besondere Sorgfalt ist bei der Konstruktion von Bodenplatten notwendig, weil hier zum einen bereits unmittelbar nach dem Erhärten eine Wechselwirkung zum Baugrund besteht und zum anderen, weil die Zwangbeanspruchungen dieser Bauteile oftmals gerade in der Bauphase höher sind als nach der Fertigstel-

lung; etwa dann, wenn im Endzustand eine Bedachung die Sonneneinstrahlung mindert. Für die Bodenplatte eines Wasserbehälters gibt Uhlenberg in /11/ zwei mögliche Grenzzustände für die Bemessung der Zwangbeanspruchungen an, die nachfolgend durch Zahlenbeispiele erläutert werden.

Grenzzustand 1: Zwischen dem Unterbeton und dem Konstruktionsbeton besteht eine verformungsarme Verbindung

$$\begin{aligned} \text{Längenänderungen: Schwinden } \epsilon_{SO} &= -15 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8 = 12 \cdot 10^{-5} \\ &= 12 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \text{Temperatur} & \quad \quad \quad t = 15 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \Sigma t_o &= 12 + 15 = \underline{27 \text{ } ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

für einen Abschnitt der Länge 1 m gilt damit

$$\Delta L = \alpha_T \cdot L \cdot t_o = 10^{-5} \cdot 10^3 \cdot 27 = 0,27 \text{ mm}$$

Betonspannung im Zustand 1

$$\sigma_b = \alpha_t \cdot E_b \cdot t_o = 10^{-5} \cdot 34.000 \cdot 27 = \underline{\underline{9,18 \text{ N/mm}^2}}$$

Diese Spannung überschreitet den 5 %-Fraktilwert der aufnehmbaren Betonzugspannung β_z ; die Platte reißt auf. Die Verkürzung muß durch Anordnung einer ausreichenden Bewehrung auf mehrere Risse (z. B. 3 Risse) verteilt werden.

$$w_m = \frac{0,27}{3} = 0,09 \approx \underline{\underline{0,1 \text{ mm}}}$$

Grenzzustand 2: Die Bodenplatte kann auf dem Untergrund gleiten. Dabei ist ein Reibbeiwert zu berücksichtigen.

Reibbeiwert z. B. $\mu = 1,0$

Abstand vom Ruhepunkt $\approx 50 \text{ m}$

Auflast: $q = L \cdot d \cdot \gamma + p = 50 \cdot 0,4 \cdot 25 + 10 = \underline{510 \text{ kN/m}}$

Betonspannung $\sigma_{bz} = \frac{0,510}{0,4} \cdot 1,0 = \underline{1,3 \text{ N/mm}^2} \leq \beta_z$

Die Zwangbeanspruchung führt im Grenzzustand 2 nicht unbedingt zum Aufreißen des Betons.

Auch Kordina /7/ weist im Zusammenhang mit einer Untersuchung der Fa. Stahlton über die Einsatzmöglichkeiten von dauerkorrosionsgeschützten Spanngliedern ohne Verbund bei der Konzeption von Bauteilen, die für den Schutz gegenüber wassergefährdenden Stoffen als dichte Betonbauteile ausgeführt werden sollen, auf eine Modellvorstellung zur Berechnung von Fundament - bzw. Bodenplatten hin. Sie erlaubt eine Abschätzung des Reibungseinflusses auf die Änderung der Vorspannkraft bei dicken Platten.

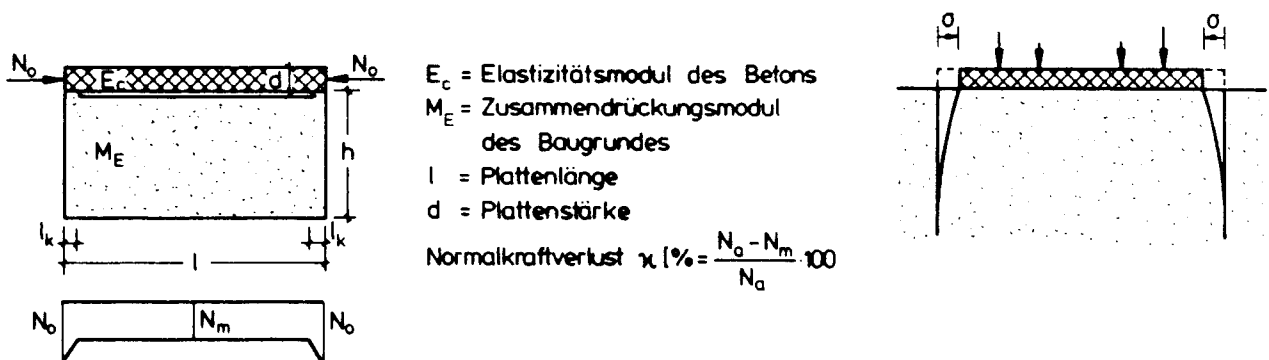


Bild 3.2: Modellvorstellung zur Erfassung der Normalkraftverluste aus Reibung bei dicken vorgespannten Bodenplatten aus /7/

Dieses Modell unterstellt eine elastische Mitverformung des Baugrundes. Es geht ferner davon aus, daß der Normalkraftverlust in der Krafteinleitungszone l_R vollständig über Reibung in den Boden geleitet wird. Dazwischen findet keine horizontale Kraftübertragung statt. Betonplatte und Baugrund verkürzen sich in diesem Bereich gleichmäßig. Die Höhe h der mitwirkenden Baugruntiefe über der unverschieblich bleibenden Schicht wurde mit $0,25 \cdot l$ bzw. $0,50 \cdot l$ angenommen.

Bild 3.3 veranschaulicht die an diesem Modell ermittelten Normalkraftverluste. Sie verbleiben für übliche Plattenabmessungen mit Verhältnissen $l/d < 150$ bei mittlerem Baugrund unter 8 %.

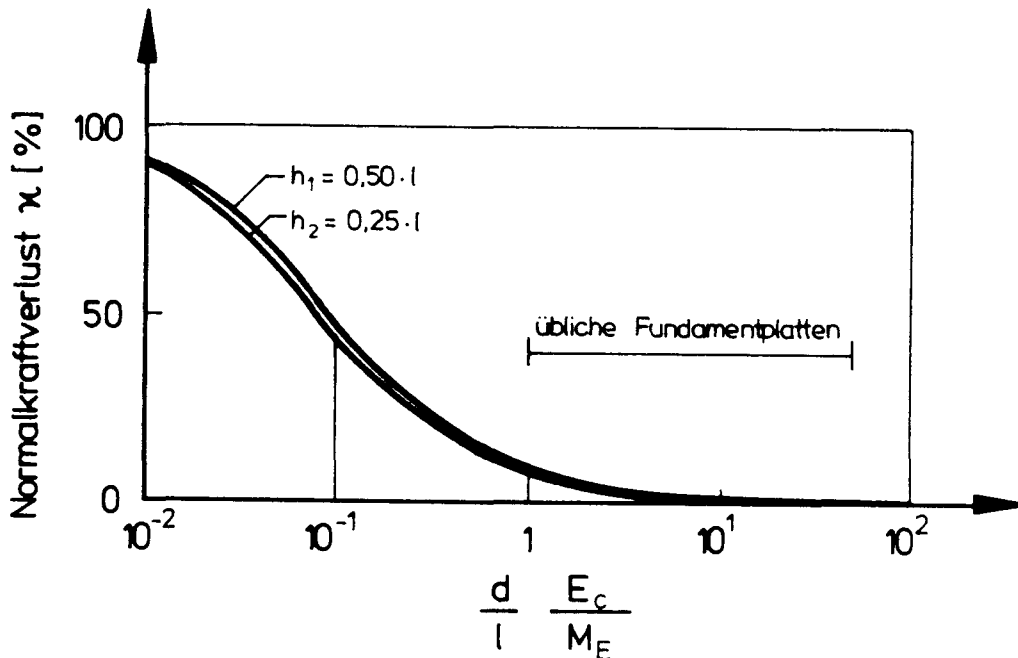


Bild 3.3: Normalkraftverluste von Bodenplatten in %, ermittelt nach Bild 3.2

Während der Nutzungsdauer eines Bauwerkes können im Gebrauchszustand folgende Beanspruchungen auftreten:

- Temperatur
- Eigenlasten des Bauwerkes, Verkehrs- und Stapellasten
- Setzungsunterschiede

Temperaturunterschiede werden unter Betriebsbedingungen oftmals nicht größer als im Bauzustand. Auch Schwindverformungen

sind in der Regel weitgehend abgeklungen. Die größten Zugspannungen entstehen vorwiegend aus den Eigen- und Verkehrslasten. Baugrundverformungen sollten so begrenzt werden, daß daraus keine nennenswerten Zwangwirkungen entstehen können.

4 Eigene Versuche zur Entwicklung dichter, chemisch widerstandsfähiger Betone

4.1 Allgemeines

Die Gebrauchsfähigkeit von Bauteilen, die zum Schutz gegenüber wassergefährdenden Stoffen eingesetzt werden, wird über die in Abschnitt 3 erläuterten konstruktiven Anforderungen zur Verminderung der Rißbildung hinausgehend wesentlich davon bestimmt, ob der verwendete Beton den chemisch angreifenden Stoffen ausreichend lange widersteht. Neuere Forschungsergebnisse /3,5/ zeigen, daß Transportmechanismen für das Fortschreiten eines lösenden Angriffs auf Beton und Zementstein ähnlich bedeutungsvoll sind wie die Art und die Konzentration der angreifenden Stoffe. Im Hinblick auf diesen Zusammenhang soll die vorliegende Forschungsarbeit zur Entwicklung dichter Betone mit geringer Durchlässigkeit und hoher Widerstandsfähigkeit beitragen.

4.2 Rezepturen der untersuchten Betonmischungen

4.2.1 Mischung mit Silica-Staub

In den vergangenen Jahren erlangte Silicastaub als Betonzusatzstoff zunehmende Bedeutung /4,12/. Silica Staub (Condensed Silica Fume "CSF") besteht aus sehr kleinen kugelförmigen Partikeln des amorphen Siliciumdioxids SiO_2 . Die geringe Teilchengröße - etwa 100 mal kleiner als Zement - und die große spezifische Oberfläche - $20 \text{ m}^2/\text{g}$ - ergeben folgende kennzeichnende Eigenschaften:

- Die große Oberfläche absorbiert Wasser und verhindert Sedimentation und Bluten.
- Die Kugelform verbessert die Fließeigenschaften des Frischbetons.

Über diese Eigenschaften hinausgehend erhöht der Zusatz von Silica Staub die Dichtigkeit von Beton erheblich. Um zu über-

prüfen, ob die so erhöhte Dichtigkeit auch den Widerstand gegenüber chemischen Angriffen erhöht, wurde Silica-Staub bei einer Mischung als Zusatzstoff verwendet. Sie wird daher als Silica-Mischung bezeichnet.

Rezeptur der "Silica-Mischung"

Zement PZ 45 F	400 kg/m ³
Silica-Staub	40 kg/m ³
Wasser	160 kg/m ³

==> W/B = 0,365; W/Z = 0,4

Superverflüssiger 12 kg/m³ = 3 % des Zementgewichtes

Zuschläge Sieblinie B16 Bereich 3

Korngruppe 0/2	714 kg/m ³
Korngruppe 2/8	578 kg/m ³
Korngruppe 8/16	408 kg/m ³

4.2.2 Mischung mit Flugasche

Steinkohlenflugasche entsteht bei der Verbrennung in Kraftwerken. Sie wird in Elektrofiltern als mineralischer Staub abgeschieden und etwa seit 1970 in der Bundesrepublik Deutschland bei der Betonherstellung als Zusatzstoff verwendet /2/. Auch Flugaschen können über die Verringerung des Wassergehalts und den dichtenden Einfluß die chemische Widerstandsfähigkeit verbessern /1,14/.

Rezeptur der Mischung "PZ mit Flugasche"

Zement PZ 45 F	400 kg/m ³
Flugasche	120 kg/m ³
Wasser	172 kg/m ³

Superverflüssiger 8,0 kg/m³ = 2 % des Zementgewichtes

Zuschläge Sieblinie B16 Bereich 3

Korngruppe 0/2	754,3 kg/m ³
Korngruppe 2/8	610,6 kg/m ³
Korngruppe 8/16	431,0 kg/m ³

4.2.3 Mischung mit Hochofenzement und Flugasche

In /3/ wird darauf hingewiesen, daß die Abtragsraten infolge der Einwirkung kalklösender Kohlensäure bei Betonen mit Hochofenzement erheblich geringer ist und nur rund 50 % der

Größenordnung von Betonen mit Portlandzement erreicht. Es wurde daher für diese Mischung Hochofenzement HOZ verwendet. Wegen des bereits erwähnten Einflusses einer geringen Durchlässigkeit auf die chemische Widerstandsfähigkeit wird wiederum Flugasche als Zusatzstoff verwendet.

Rezeptur der Mischung "HOZ mit Flugasche"

Zement HOZ 45 L	390 kg/m ³
Flugasche	60 kg/m ³
Wasser	176 kg/m ³
Superverflüssiger	7,8 kg/m ³ = 2 % vom Zementgewicht
Zuschläge Sieblinie B16, Bereich 3	
Korngruppe 0/2	778,7 kg/m ³
Korngruppe 2/8	630,4 kg/m ³
Korngruppe 8/16	445,0 kg/m ³

Für die Grobzuschläge (Korngruppe 8/16 mm) wurde Diabassplitt verwendet.

4.2.4 Vergleichsmischung ohne Betonzusatzstoffe

Zum Vergleich mit den vorab erläuterten Mischungen wurde auch eine Mischung ohne Betonzusatzstoffe verwendet. Diese Mischung sollte darüberhinaus für den Einsatz der Vakuumbehandlung besonders geeignet sein. Sie wurde deshalb mit einem hohen W/Z-Wert konzipiert.

Rezeptur der Vergleichsmischung

Zement PZ 35 F	260 kg/m ³
Wasser	195 kg/m ³
W/Z-Wert: 0,75	
Zuschläge:	
Korngruppe 0/2	866 kg/m ³
Korngruppe 2/8	184 kg/m ³
Korngruppe 8/16	775 kg/m ³

4.3 Herstellung von Versuchskörpern

Entsprechend der Zielsetzung des Forschungsvorhabens war das Untersuchungsprogramm so konzipiert, daß vor allem Aussagen zur Dichtigkeit und Widerstandsfähigkeit der verschiedenen

Betonmischungen abgeleitet werden konnten. Dafür wurden 8 cm dicke Platten mit Seitenlängen $l \cdot b = 30 \cdot 30$ cm in Schalungen betoniert, durch Rütteln verdichtet und an den freien Oberflächen von Hand geglättet und abgezogen.

Wegen der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonflächen versucht man bereits seit langem, insbesondere bei der Herstellung von Fußböden, den Konstruktionsbeton so auszuführen, daß seine Oberfläche den Anforderungen an das jeweilige Bauwerk unmittelbar entspricht. Zur Vergütung der Stahlbetonoberflächen hat sich die Vakuumbehandlung bewährt. Auch wenn bekannt ist, daß Beton mit einem hohen Gehalt an Feinbestandteilen weniger für die Vakuumbehandlung geeignet ist, als Beton mit höherem Grobkorngehalt, so wurde dennoch aus allen in Abschnitt 4.2 beschriebenen Mischungen jeweils eine Versuchsplatte hergestellt, die nach dem Einfüllen des Betons in die Schalung einer Vakuumbehandlung unterzogen wurde. Im einzelnen ergab sich bei diesen Versuchsplatten folgender Herstellungsablauf:

- Aufstellen der Schalung jeweils für die Plattenabmessung $1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m}$
- Einbringen des Frischbetons in die Schalung, Verdichten des Betons und Abziehen mit der Rüttelbohle (siehe Bild 4.1)
- Auflegen einer Filterschicht und des Vakuumteppichs sowie Anschluß an eine Vakuumpumpe
- Absaugen des Überschußwassers. Dabei wird mit der Vakuumpumpe und einer angeschlossenen Schlauchleitung über den Vakuumteppich ein Unterdruck auf den Beton aufgebracht. Unter dem Druckgefälle wird der Beton zusammengepreßt, freies Wasser, das nicht bei der Hydratation des Zementes gebunden wird, tritt an der Oberfläche aus und läuft über Drainagekanäle in einen Auffangbehälter. Neben der Verdichtung des Betons wird damit als wesentlicher Effekt der Vakuumbehandlung eine Reduzierung des W/Z-Wertes erreicht (siehe Bild 5.2).

- Unmittelbar nach Beendigung der Vakuumbehandlung wurde die Oberfläche geglättet, wegen der geringen laborgemäßen Abmessungen wurde anschließend nochmals von Hand nachgerieben.
- Die "Vakuumplatten" wurden dann mit feuchten Tüchern bedeckt und 1 Woche nachbehandelt. Dann erfolgte die Lagerung im Klimaraum.

Das Frischbetonvolumen war jeweils so gewählt worden, daß die konventionell hergestellten Platten und die Vakuumplatten, sowie die Würfel zur Überprüfung der Festigkeit aus einer Mischung betoniert werden konnten.

4.4 Untersuchungsprogramm

Für jede Mischung wurde die Druckfestigkeitsentwicklung überprüft. Dafür wurde die Druckfestigkeit an Würfeln mit der Kantenlänge 15 cm nach 7, 14, 28 und 90 Tagen bestimmt. Um den Einfluß der Vakuumbehandlung auf die Festigkeit über die Querschnittshöhe zu untersuchen, wurden an den Vakuumplatten darüberhinaus Bohrkerne entnommen. Aus diesen Bohrkernen wurde jeweils an der Platten Ober- und Unterseite ein zylindrischer Prüfkörper mit dem Verhältnis Höhe/Durchmesser $h/D = 1,0$ herausgeschnitten. Daran wurde ebenfalls die Druckfestigkeit überprüft.

An den konventionell hergestellten Platten wurden ebenso wie an Abschnitten mit gleicher Grundfläche, die aus den Vakuumplatten herausgeschnitten worden waren, die Eindringung von Flüssigkeiten untersucht. Dabei wurden die Eindringung von Wasser und die Lösung von Kalk infolge Säurewirkung aufgezeichnet.

Der Widerstand der untersuchten Mischungen gegenüber mechanischen Einwirkungen wurde über den Abrieb an der "Böhme'schen Schleifscheibe" nach DIN 52 108 bestimmt.

Die Neigung der Mischungen zum Frühschwinden (plastisches Schwinden) wurde an Versuchskörpern mit den Abmessungen 10 ·

10 · 70 cm überprüft, die im Klimaraum gelagert wurden. Die Verformung des in Stahlschalungen eingebrachten Betons wurde ausgehend vom Zeitpunkt unmittelbar nach dem Einbringen der Mischung mittels einbetonierter Wegaufnehmer gemessen.

Um Unterschiede in der Struktur des Betongefüges aufzuzeigen, wurden Proben aus jeder Mischung mit den Verfahren der Quecksilberdruckporosimetrie und der Differentialthermoanalyse (DTA) untersucht /6/.

5 Versuchsergebnisse

5.1 Druckfestigkeit der untersuchten Mischungen

Die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeiten, die an Würfeln mit der Kantenlänge 15 cm begleitend ermittelt wurden, ist in Bild 5.1 für die untersuchten Mischungen aufgetragen. Die Betone mit Zusatzstoffen erreichten auf Grund ihres hohen Zementgehalts in Verbindung mit der gewählten Rezeptur ein hohes Festigkeitsniveau mit $\beta_w > 70 \text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen. Die rascheste Festigkeitsentwicklung hatte die Mischung mit Silica Zugabe. Ein geringfügig langsamerer Festigkeitsanstieg wurde erwartungsgemäß bei dem Beton mit HOZ und Flugasche beobachtet. Als Vergleichsmischung wurde ein Beton der Güte B 25 angestrebt, um üblichen Baustellenverhältnissen zu entsprechen.

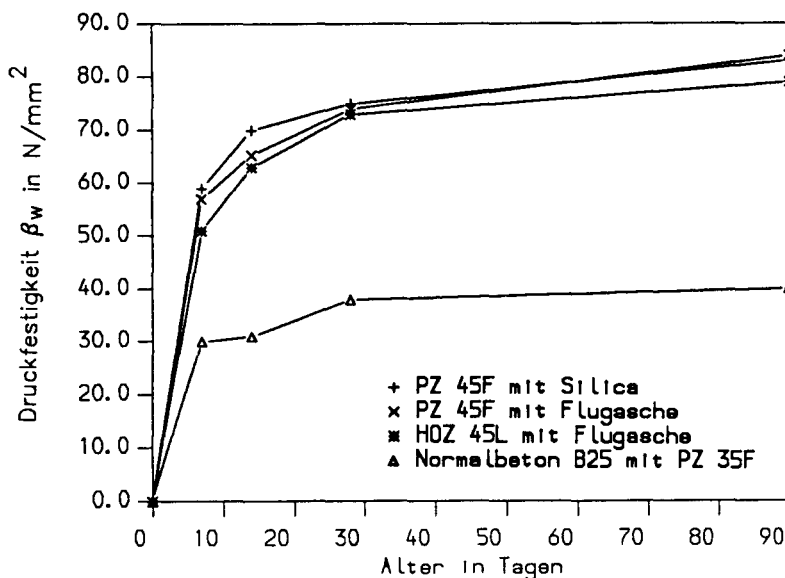


Bild 5.1: Druckfestigkeitsentwicklung der untersuchten Betone

Die Druckfestigkeit der Bohrproben, die aus den vakuumbehandelten Platten nach der Erhärtung entnommen worden waren, ist in Tabelle 5.1 aufgetragen.

Mischung	Lage der Probe	$\beta_{C,28}$ [N/mm ²]	$\beta_{W,28}$
PZ mit Silica	oben	67,23	75,0
	unten	70,73	
PZ mit Flugasche	oben	63,57	74,0
	unten	61,6	
HOZ mit Flugasche	oben	67,0	73,0
	unten	61,13	
Vergleichsbeton B25	oben	40,4	38,0
	unten	33,3	

$\beta_{C,28}$: Bauteilproben mit Vakuumbehandlung

$\beta_{W,28}$: Vergleichswürfel ohne Vakuumbehandlung

Tabelle 5.1: Mittlere Druckfestigkeit der Proben aus den Vakuumplatten

Für die Silica-Mischung ist kein Einfluß der Vakuumbehandlung zu erkennen. Bei dieser Rezeptur verhinderte der hohe Feinbestandanteil, daß sich das Druckgefälle bis in größere Querschnittstiefen auswirken konnte. Dies zeigte sich bereits bei der Vakuumbehandlung in der geringen abgesaugten Wassermenge und wird durch die niedrigere Druckfestigkeit der aus dem oberen Querschnittsbereich entnommenen Probe bestätigt.

Dagegen deuten bei den anderen Betonen die höheren Festigkeiten der beim Betonieren oben gelegenen Proben gegenüber den an der Unterseite entnommenen Proben auf die Verdichtungswirkung der Vakuumbehandlung hin. Die geringere Schwerkraftwirkung und Rüttelintensität im oberflächennahen Bereich, die hier eher niedrigere oder allenfalls annähernd gleiche Festigkeiten ergäbe, wird durch das Druckgefälle und den Wasserentzug aufgehoben. Bei der Mischung mit Hochofenzement und Flugasche sowie bei dem Vergleichsbeton ist die Druckfestigkeitserhöhung am ausgeprägtesten. Dies deutet auch auf ein dichteres Betongefüge mit geringerer Porosität in diesen Bereichen hin.

Im übrigen wird hier deutlich, das die Vakuumbehandlung nur geeignet erscheint, die in Bauteilen gegenüber Gütewürfeln geringere Betondruckfestigkeit in etwa wieder auf die Höhe der Gütewürfelfestigkeit anzuheben.

5.2 Wassereindringung

Die Dichtigkeit der untersuchten Betonmischungen gegenüber Wasser wurde analog der Wasserdurchlässigkeitsprüfung in DIN 1048, Teil 1 vorgenommen. Dabei wurden sowohl die konventionell mit Handabzug hergestellten plattenartigen Probekörper als auch die Probekörper, die aus den vakuumbehandelten Platten herausgeschnitten worden waren, geprüft. Der Wasserdruck wirkte auf die beim Betonieren oben gelegene Seite, die vorab mit einer Drahtbürste aufgerauht und gründlich von Zementschlämmeablagerungen befreit worden war. Zuerst wurde 48 Stunden lang ein Druck von 1 bar aufgebracht, danach 24 Stunden ein Druck von 3 bar und dann 24 Stunden ein Druck von 7 bar. Nach der Wasserdruckbeaufschlagung wurden die Probekörper gespalten und an den frischen Bruchflächen die Wassereindringtiefe ermittelt. Eine Darstellung der benetzten Flächen enthalten die Bilder 5.2 und 5.3. Sie zeigen, daß die aus Normalbeton der Güte B 25 hergestellte Vergleichsmischung eine deutlich höhere Wassereindringung aufweist, als die Mischungen mit Zusatzstoffen. Eine infolge der Vakuumbehandlung verminderte Wassereindringung ist nicht erkennbar. Dagegen ist bei allen Mischungen mit Zusatzstoffen (Silica-Staub oder Flugasche) nach der Vakuumbehandlung eine deutlich verminderte Wassereindringung zu beobachten.

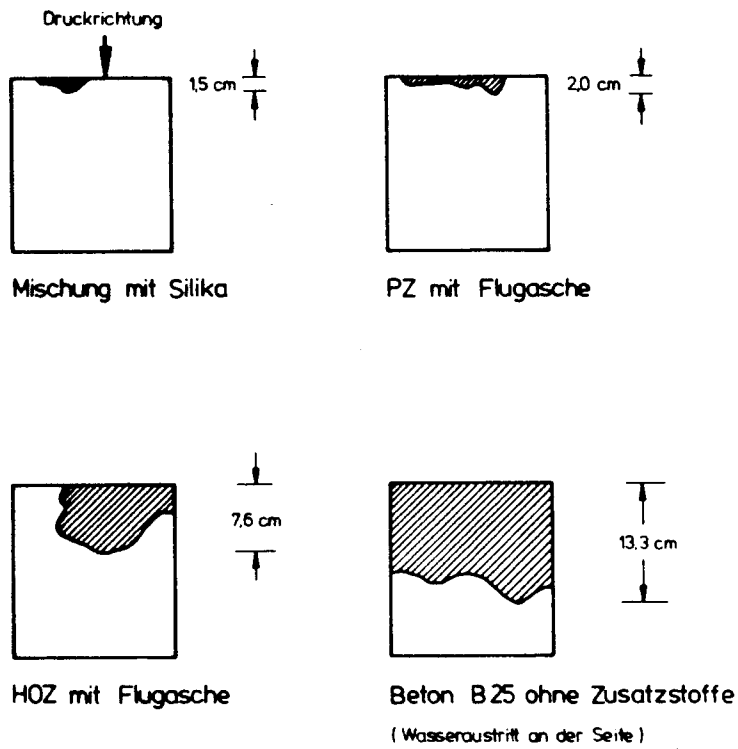


Bild 5.2: Darstellung der benetzten Flächen nach der Wassereindringprüfung bei den konventionell hergestellten und verdichteten Probekörpern

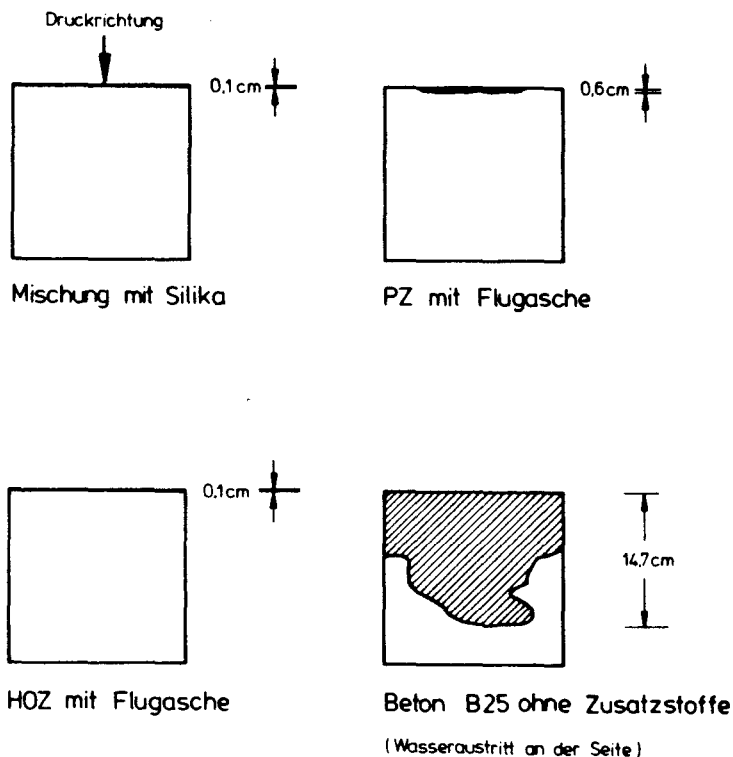


Bild 5.3: Darstellung der benetzten Flächen nach der Wassereindringprüfung bei den vakuumbehandelten Probekörpern

5.3 Prüfung der chemischen Beständigkeit

Der Umfang des Katalogs der wassergefährdenden Stoffe /9/ schließt aus, daß im Rahmen dieser Forschungsarbeit alle möglichen Chemikalien oder auch nur ein Beispiel jeder Gruppe mit vergleichbaren Klassifizierungsmerkmalen untersucht werden konnte. Zur Erzielung charakteristischer Ergebnisse, die für eine große Anzahl von Anwendungsfällen repräsentative Aussagen erlauben, wurden die Betonoberflächen deshalb mit einer 18 %-igen Salzsäure (HCl) beaufschlagt. In zwei Prüfzyklen wurden sowohl die konventionell verdichteten Betonplatten als auch aus den vakuumbehandelten Platten herausgeschnittene Probeplatten dem HCl-Angriff ausgesetzt. Dabei wirkte die Salzsäure auf die beim Betonieren abgeriebene bzw. vakuumbehandelte obere Fläche.

Auf die mit einer Drahtbürste gründlich von loser Zement-schlämme befreite Oberfläche des Probekörpers wurde ein Glas-zylinder mit Siliconkautschuk so aufgekittet, daß keine Salz-säure austreten konnte. Eine Prüfperiode erstreckte sich über 10 Tage. Während dieser Zeit standen täglich für eine Dauer von 6 Stunden jeweils 200 ml HCl (ca. 18 M.-%) in dem aufge-kitteten Glaszylinder. Nach Ablauf der 6-stündigen Einwir-kungsdauer wurde die Salzsäure abgesaugt, so daß während der nachfolgenden 18 Stunden nur ein geringer Rest Salzsäure ein-wirkte, der nicht abgesaugt werden konnte. Die in der abge-saugten Salzsäure gelösten Calciumanteile wurden bestimmt. In den Bildern 5.4 und 5.5 ist die Veränderung der gelösten Cal-ciumanteile über die Dauer der Prüfperiode aufgetragen. Man erkennt, daß nach etwa 5 bis 7 Einwirkungszyklen ein annä-hernd gleichbleibender Calciumanteil gelöst wurde. Die Erhö-hung des Lösungsanteils in Bild 5.4 beim 5. und 9. Prüfzyklus ist auf einen verlängerten Zeitraum zwischen den Prüfzyklen zurückzuführen, bei dem der nicht absaugfähige Säurerest zum weiteren Fortschreiten des Lösungsvorganges ausreichte. Ein Auslaufen des Lösungsvorgangs oder eine weitere Abnahme ist am Ende der Prüfperioden nach 10 Zyklen nicht erkennbar.

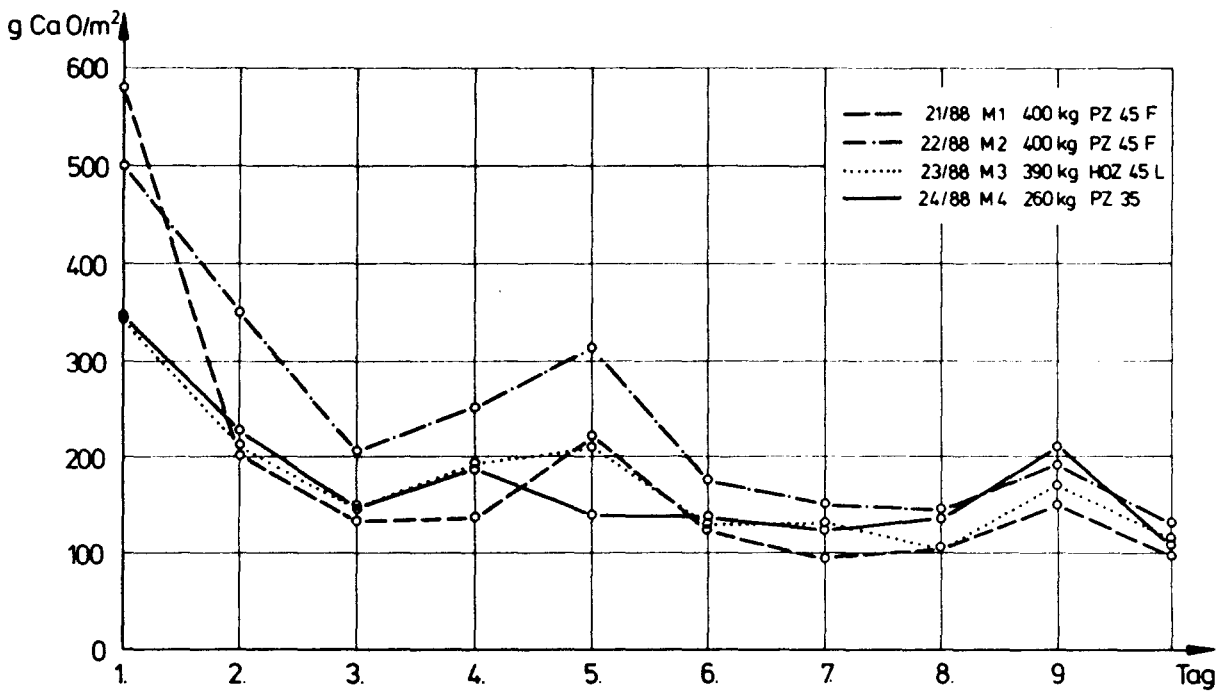


Bild 5.4: Veränderung des gelösten Calciumanteils über die 10-tägige Prüfperiode bei den konventionell hergestellten Prüfkörpern

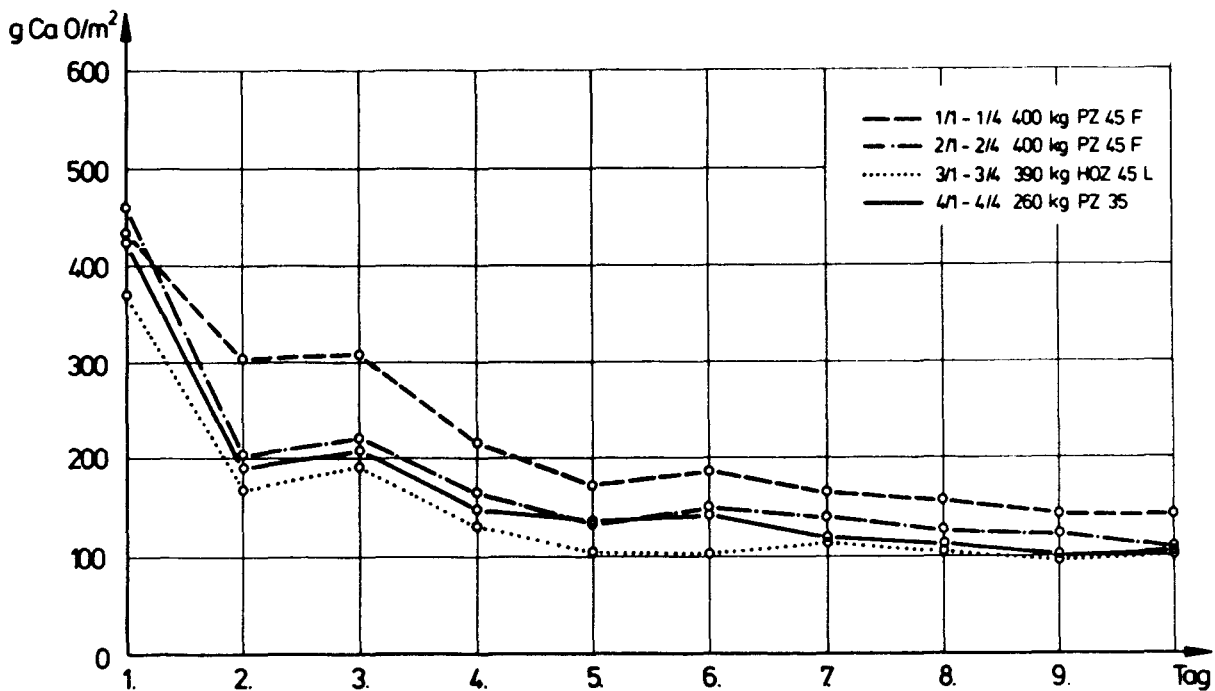


Bild 5.5: Veränderung des gelösten Calciumanteils über die 10-tägige Prüfperiode bei den vakuumbehandelten Prüfkörpern

Zwischen den handabgezogenen und den vakuumbehandelten Prüfkörpern ist hinsichtlich der Größenordnung des gelösten Calciumanteils kein signifikanter Unterschied festzustellen. In beiden Prüfperioden wies die Mischung mit Silica-Staub die höchsten Lösungsanteile auf. Da aus den Zuschlägen aller untersuchten Mischungen Calciumanteile allenfalls in untergeordneter Größenordnung gelöst werden konnten, muß der wesentliche Calciumanteil aus dem Zementstein stammen. Aus einem Vergleich der Silica-Mischung mit den Mischungen, denen Flugasche zugegeben wurde, kann daher wegen des vergleichbaren Zementgehaltes geschlossen werden, daß die Schädigung des Zementsteins bei der Silica-Mischung weiter fortgeschritten ist. Diese Aussage gilt auch für die Vergleichsmischung (Normalbeton B 25). Trotz eines mit 260 kg/m^3 gegenüber 400 kg/m^3 bei den anderen Mischungen deutlich geringere Zementgehaltes, wurde Calcium in vergleichbarer Größenordnung gelöst. Es muß also entweder ein größeres Zementsteinvolumen geschädigt sein oder der Schadensgrad des Zementsteins ist weiter fortge-

schritten. Auch das Erscheinungsbild der Betonoberfläche nach den Prüfperioden bestätigt diesen unterschiedlichen Schädigungsgrad. Bei der Silica-Mischung und der Vergleichsmischung liegen mehr Zuschlagkörner bis in eine größere Tiefe frei (siehe Bilder 5.6 bis 5.9)

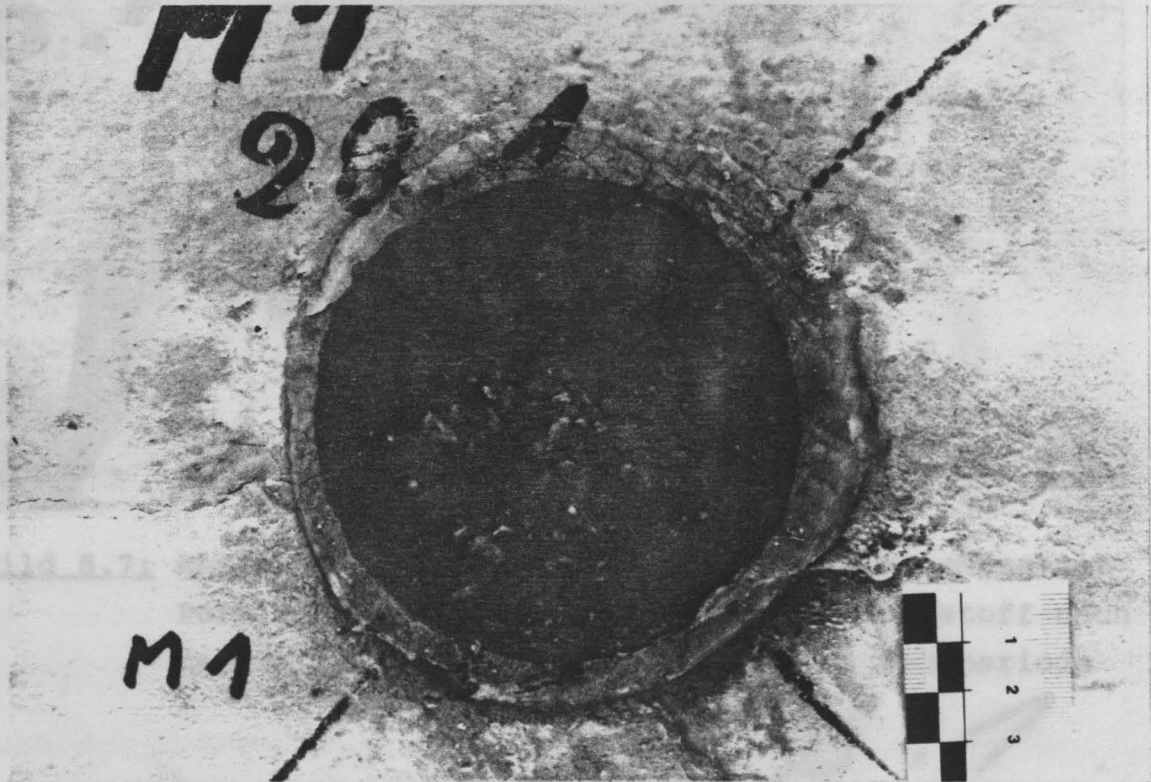


Bild 5.6: Ansicht der Betonoberfläche bei der Mischung mit Silica als Zusatzstoff nach der Salzsäureeinwirkung am Ende der Prüfperiode



Bild 5.7: Ansicht der Bodenoberfläche bei der Mischung mit Portlandzement und Flugasche als Zusatzstoff nach der Salzsäureeinwirkung am Ende der Prüfperiode

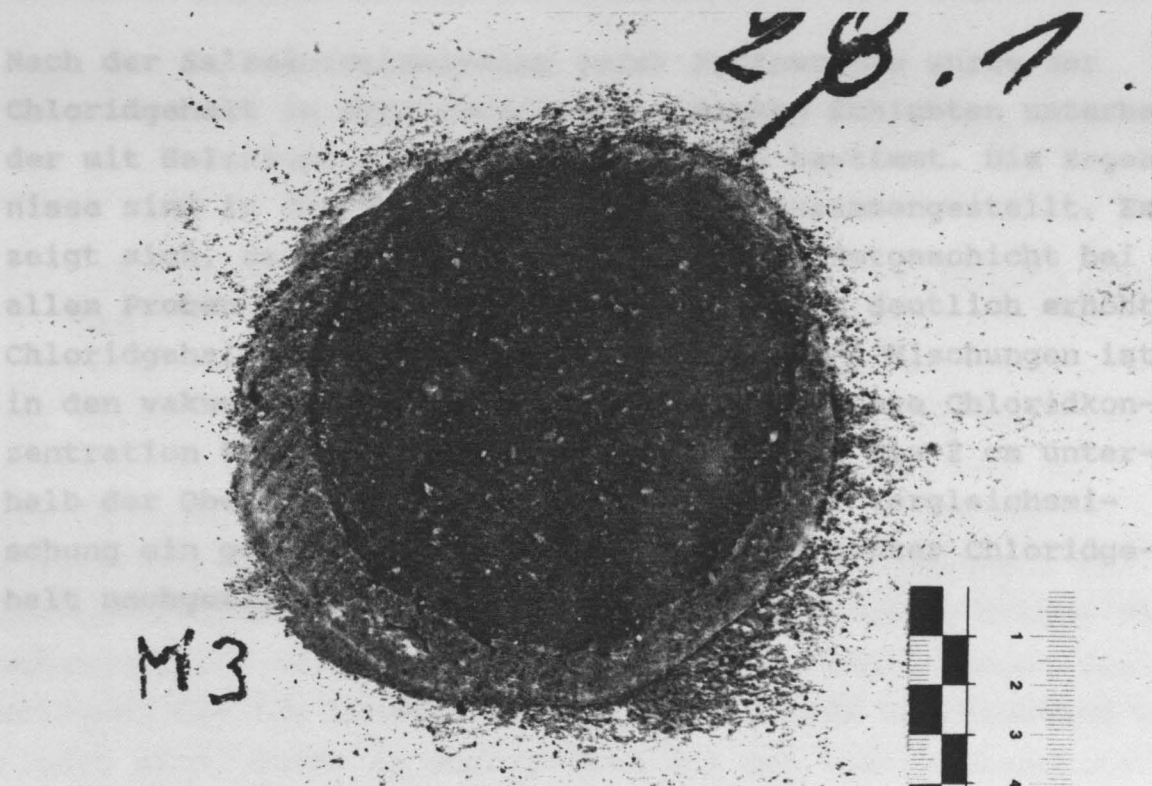


Bild 5.8: Ansicht der Betonoberfläche bei der Mischung mit Hochofenzement und Flugasche als Zusatzstoff nach der Salzsäureeinwirkung am Ende der Prüfperiode

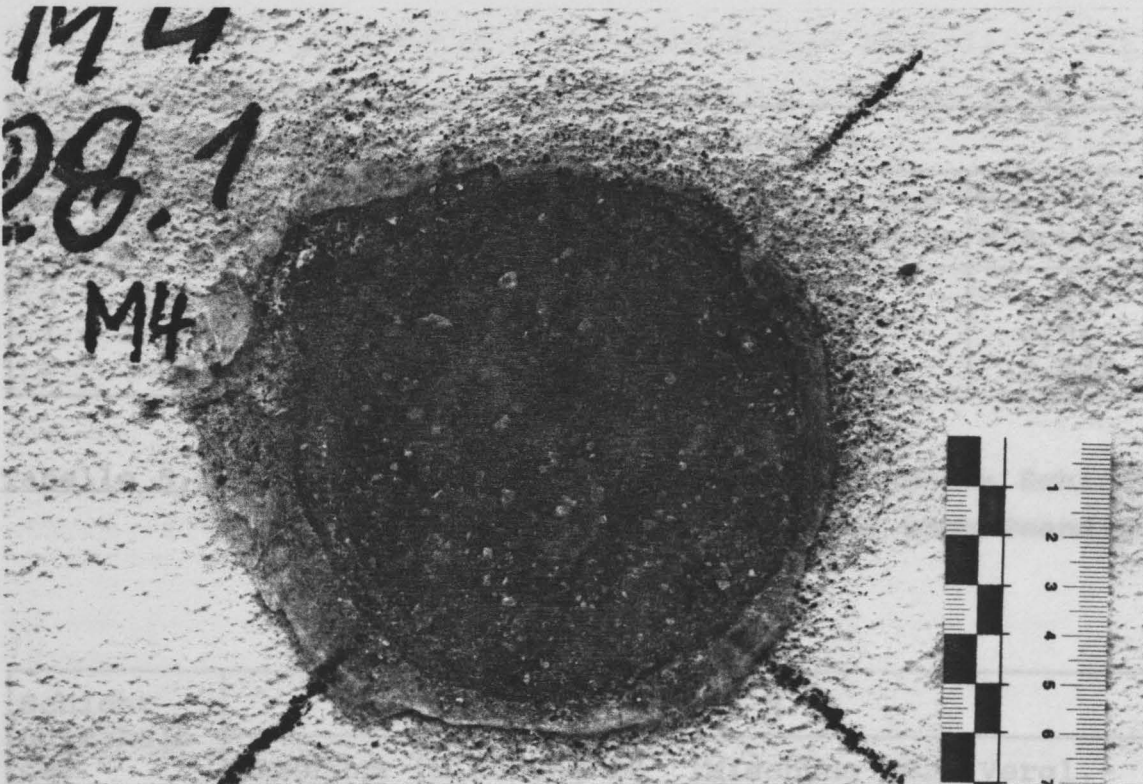


Bild 5.9: Ansicht der Betonoberfläche bei der Vergleichsmischung (Normalbeton B 25) nach der Salzsäureeinwirkung am Ende der Prüfperiode

Nach der Salzsäureeinwirkung jeder Prüfperiode wurde der Chloridgehalt in drei jeweils 1 cm dicken Schichten unterhalb der mit Salzsäure beaufschlagten Fläche bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 5.2 und 5.3 zusammengestellt. Es zeigt sich, daß in der oberen 1 cm dicken Betonschicht bei allen Proben ein gegenüber dem Ausgangswert deutlich erhöhter Chloridgehalt angetroffen wurde. Bei allen 4 Mischungen ist in den vakuumbehandelten Platten eine geringere Chloridkonzentration entstanden. In der Schicht von 1 bis 2 cm unterhalb der Oberfläche wurde lediglich bei der Vergleichsmischung ein gegenüber den Ausgangswerten erhöhter Chloridgehalt nachgewiesen.

großen Interesse. Da eine wesentliche Zielsetzung dieser Forschungsarbeit darin bestand, derartige Betonmischungen festzulegen, die für Konstruktionen ohne weitere Beschichtung geeignet sind, wurde an Betonproben aus den vakuumbehandelten Prüfplatten auch der Oberflächenverschleiß überprüft. Diese Prüfung erfolgte für jede Mischung an jeweils drei Prüfkörpern nach DIN 52 108 mit der "Böhme'schen Schleifscheibe".

Schicht unterhalb der Oberfläche	Chloridgehalt in M.-%			
	Mischung Silica	Mischung PZ mit Flugasche	Mischung HOZ mit Flugasche	Vergl.- Mischung
0 - 1 cm	2,21	1,66	1,89	1,61
1 - 2 cm	0,16	0,045	0,063	0,56
2 - 3 cm	0,014	0,0057	0,0067	0,025

Tabelle 5.2: Chloridgehalt in den oberflächennahen Schichten der handabgezogenen Prüfplatten nach Beendigung der Prüfperiode

Schicht unterhalb der Oberfläche	Chloridgehalt in M.-%			
	Mischung Silica	Mischung PZ mit Flugasche	Mischung HOZ mit Flugasche	Vergl.- Mischung
0 - 1 cm	1,31	1,31	1,55	1,37
1 - 2 cm	0,016	0,014	0,071	0,133
2 - 3 cm	0,013	0,012	0,060	0,01

Tabelle 5.3: Chloridgehalt in den oberflächennahen Schichten der vakuumbehandelten Prüfplatten nach Beendigung der Prüfperiode

5.4 Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen

Für Betonoberflächen an Abfüllanlagen, Lager- und Umschlagplätzen, die den Betriebsbedingungen ohne ergänzende Beschichtungen dauerhaft standhalten sollen, ist die Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen von großem Interesse. Da eine wesentliche Zielsetzung dieser Forschungsarbeit darin bestand, derartige Betonmischungen festzulegen, die für Konstruktionen ohne weitere Beschichtung geeignet sind, wurde an Betonproben aus den vakuumbehandelten Prüfplatten auch der Oberflächenverschleiß überprüft. Diese Prüfung erfolgte für jede Mischung an jeweils drei Prüfkörpern nach DIN 52 108 mit der "Böhme'schen Schleifscheibe".

Dabei wird ein Prüfkörper mit quadratischer Prüffläche auf eine mit Norm-Schleifmittel bestreute Schleifbahn aufgesetzt. Unter einer Belastung von 294 N wird die zu prüfende Fläche in 16 Prüfperioden mit jeweils 22 Umdrehungen beansprucht. In jeder Prüfperiode wird die untersuchte Fläche um 90 % gedreht. Der Schleifverschleiß wird als Volumenverlust angegeben. Für die hier untersuchten Betonoberflächen ist er in Tabelle 5.4 angegeben. Es zeigt sich zwischen den drei Mischungen mit Zusatzstoffen eine gute Übereinstimmung und ein deutlich geringerer Volumenverlust als bei der Vergleichsmischung, die etwa der Güte eines B 25 entsprach.

Proben Nr.	Volumenverlust in cm ³			
	Mischung Silica	PZ 45 F mit Flugasche	HOZ 45 L mit Flugasche	Normalbeton B 25
1	7,15	7,21	8,01	10,50
2	7,54	7,30	7,76	10,43
3	7,28	7,62	7,96	9,61
Mittel	7,32	7,38	7,91	10,18

Tabelle 5.4: Volumenverluste in cm³ je 50 cm² Prüffläche, ermittelt an der Schleifscheibe nach Böhme (DIN 52 108)

5.5 Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie und der Differentialthermoanalyse

Die Widerstandsfähigkeit von Betonen gegenüber lösendem Säureangriff ist nicht nur von der Löslichkeit der Zementkomponenten, sondern ebenfalls von der Porosität abhängig. Um festzustellen, ob und in welchem Ausmaß die verschiedenen Zusatzstoffe einen Einfluß auf die Dichtigkeit des Betons haben, wurde an Probekörpern der verschiedenen Betonmischungen die Porosität bzw. die Porenradienverteilung gemessen. Als Meßverfahren wurde die Quecksilberdruckporosimetrie verwendet. Bei der Quecksilberdruckporosimetrie wird die Oberflächenspannung des Quecksilbers und der Benetzungswinkel mit dem zu untersuchenden Werkstoff benutzt, um die Radien der

Poren zu berechnen, in die das Quecksilber unter Aufbringung eines stetig steigenden Druckes hineingepreßt wird. Zwischen dem äußeren Druck p und dem Porenradius r besteht folgende Beziehung:

$$r = \frac{2 \sigma \cdot \cos \gamma}{p}$$

wobei σ die Oberflächenspannung des Quecksilbers (480 dyn/cm) und γ der Benetzungswinkel mit dem jeweiligen Material ist (hier $141,3^\circ$). Das zur Verfügung stehende Porosimeter mit einem Maximaldruck von 2000 bar hat nach obiger Gleichung einen Meßbereich von 4 nm bei $7,5 \mu\text{m}$ (Minimaldruck = 1 bar).

In Bild 5.10 ist die Porenradienverteilung der einzelnen Betonmischungen dargestellt.

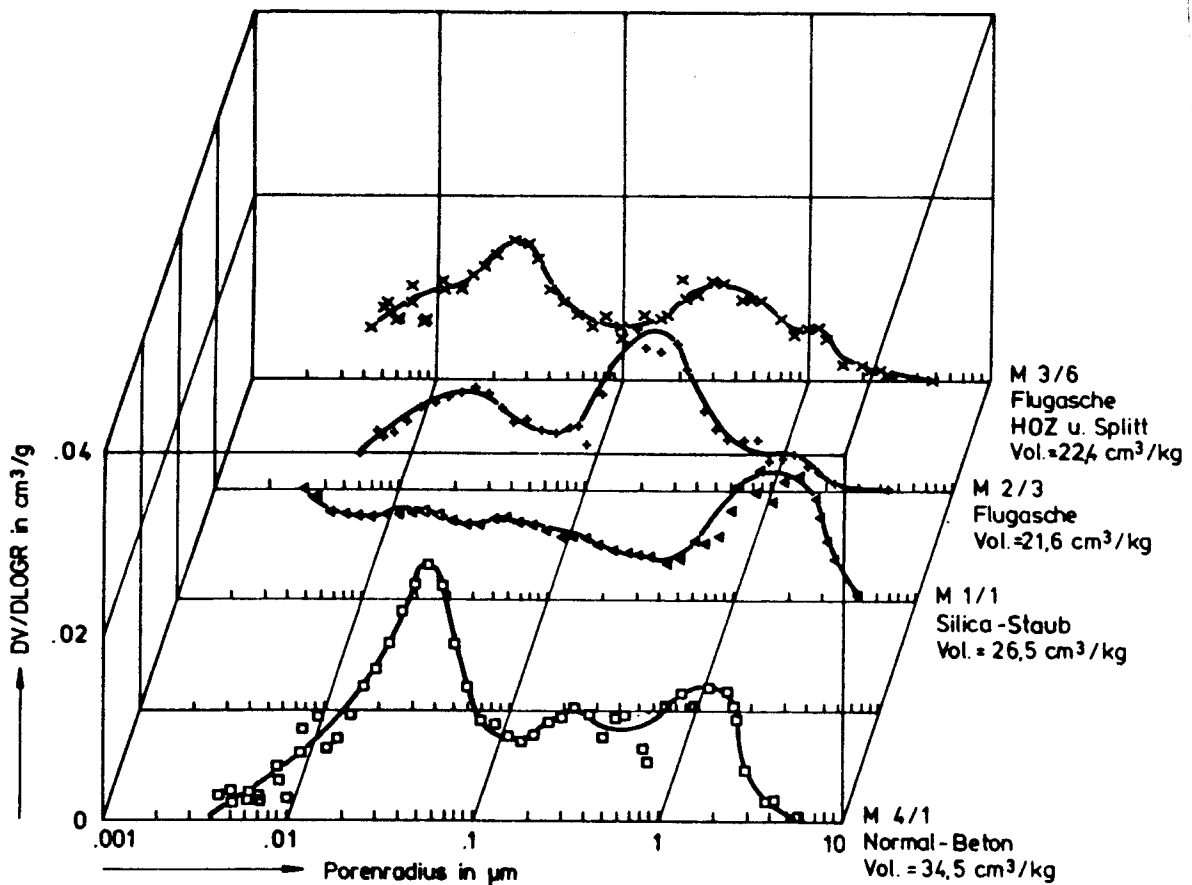


Bild 5.10: Porenradienverteilung und Porenvolumen

Beim Normalbeton sind in der Porenradienverteilungskurve 2 Haupt-Maxima bei $0,05\ \mu\text{m}$ und $1\ \mu\text{m}$ zu erkennen. Im Bereich der Meßbereichsgrenze ist praktisch kein Porenvolumen mehr vorhanden. Der Silicastaub-Beton dagegen hat eine wesentlich gleichmäßigere Porenradienverteilung. Bereits bei der Meßbereichsgrenze bei $0,004\ \mu\text{m}$ ist ein erhöhtes Porenvolumen erkennbar, es fehlt das ausgeprägte Maximum bei $0,05\ \mu\text{m}$, für Porenradien bis $0,7\ \mu\text{m}$ sinkt der Porenvolumenanteil stetig, bei $1\ \mu\text{m}$ ist ein ausgeprägtes breites Maximum.

Die Kurven der Porenradienverteilung für die Betonmischungen mit Flugasche und HOZ (M3/6) und mit Flugasche und Portlandzement (M2/3) ähneln in gewisser Weise der Normal-Betonkurve mit Maxima bei $0,05\ \mu\text{m}$ und bei $0,2$ bis $0,4\ \mu\text{m}$. Die Maxima bei $1\ \mu\text{m}$ sind jedoch deutlich geringer als beim Normalbeton.

Für die Ergebnisse der unter 5.2 beschriebenen Wassereindringversuche geben die Messungen der Quecksilberdruckporosimetrie eine überzeugende Bestätigung.

Eine unmittelbare Korrelation zwischen dem Porenaufbau und dem Widerstandsverhalten der einzelnen Betonmischungen gegenüber lösendem Säureangriff in der hier verwendeten hohen Konzentration ist nicht erkennbar. Zwar ist der verdichtende Einfluß der Betonzusatzstoffe auf die Betonstruktur aus dem Gesamtporenvolumen von $34,5\ \text{cm}^3/\text{kg}$ beim Normalbeton gegenüber von $21,6$ bis $26,5\ \text{cm}^3/\text{kg}$ bei den anderen Betonmischungen feststellbar, aber offensichtlich sind die durch die Zusatzstoffe erzeugten Reaktionsprodukte gegenüber der Salzsäure im gleichen Maß unbeständig, wie das Calciumhydroxid, welches im Normalbeton stärker vertreten ist und im allgemeinen als der entscheidende Schwachpunkt von zementgebundenen Betonen gegenüber lösendem Angriff gilt.

Um den Einfluß der Zusatzstoffe auf die Bindung von Calciumhydroxid zu ermitteln, werden von den Betonmischungen Differential-Thermo-Analysen (DTA) durchgeführt. Bei der DTA werden Wärmetönungen beim stetigen Aufheizen einer Probe gemessen, die durch Aufnahme und Abgabe von mechanisch oder chemisch gebundenem Wasser, Um- und Rekristallisation und Modi-

fikationsänderungen verursacht werden. Die Lage der exo- oder endothermen Temperaturpeaks lassen sich verschiedenen Phasen zuordnen. Aus dem Thermogramm (Bild 5.11) ist zu erkennen, daß die Proben mit Silicastaub deutlich weniger freies Calciumhydroxid (Peak bei 500 °C) enthalten, als der Normalbeton und der Flugaschebeton. Letztere Mischungen enthalten mehr Silicathydrate (Peak bei 750 - 800 °C).

Signifikante Einflüsse auf die Beständigkeit der Betonmischungen konnten auch hier nicht abgeleitet werden. Die Einflüsse der Makrostruktur der Betone und die der hohen Konzentration der verwendeten Salzsäure überwiegen offensichtlich.

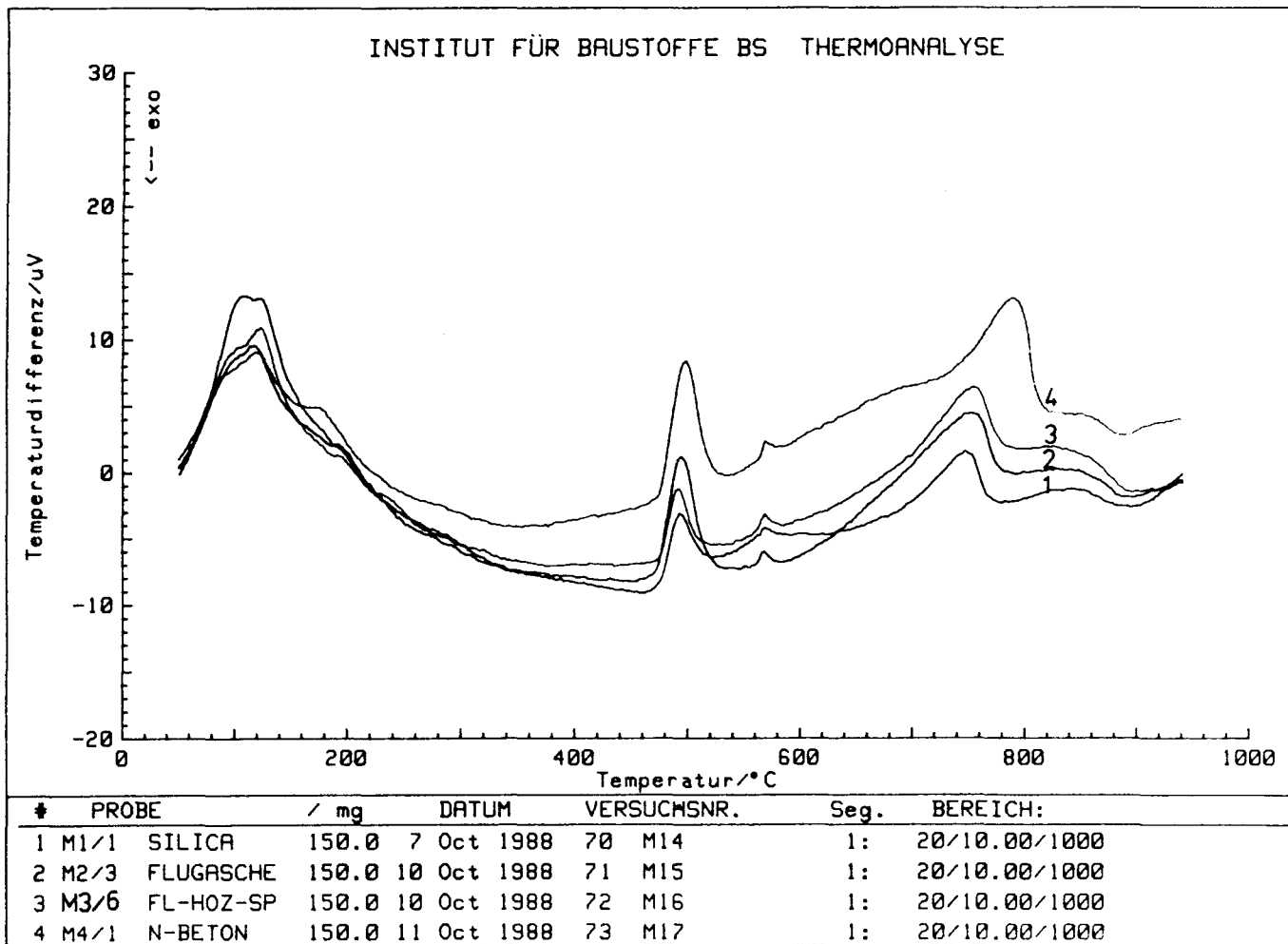


Bild 5.11: Differential-Thermo-Analyse (DTA)

5.6 Frühschwinden

Für junge Betone, an die im erhärteten Zustand hohe Dichtigkeitsanforderungen gestellt werden, interessiert das Frühschwinden oder plastische Schwinden insofern, als die damit verbundene erhöhte Wasserverdunstung die Gefahr der Schrumpfrißbildung vergrößert. Da die Neigung einer Mischung zum Bluten (Wasserabsondern) vor dem Erstarren unmittelbar im Zusammenhang mit der Schwindverkürzung steht, wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit die Verformungen an den in Stahlschaltungen eingebrachten Mischungen gemessen. Dabei ergaben sich keine Hinweise darauf, daß bei einer Mischung bis zum Erstarrungsende eine erhöhte Schwindneigung bestand. Die untersuchten Mischungen können somit als schrumpfrißunempfindlich eingestuft werden. In diesem Zusammenhang sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die Verwendung erstarrungsverzögernder Zusatzmittel, die hier nicht eingesetzt wurden, zu ungünstigeren Ergebnissen führen kann. Auch sind für eine endgültige Beurteilung der Neigung zum Frühschwinden noch schärfere Austrocknungsbedingungen zu untersuchen, als sie im Klimaraum bei 23 °C und 65 % Luftfeuchte herrschten.

6 Zusammenfassung und Ausblick auf weitere notwendige Forschungsarbeiten

Um zu verhindern, daß wassergefährdende Stoffe in den Boden eindringen, werden an Produktionsstätten, in denen Chemikalien zum Einsatz gelangen, ebenso wie an Lagerplätze, Abfüllstationen, Auffangräume und Umschlagplätze, erhöhte Anforderungen an die Abdichtung und Widerstandsfähigkeit von Betonoberflächen, insbesondere der Oberflächen von Bodenplatten gestellt. Weil Beton gegenüber zahlreichen Chemikalien nicht dauerhaft widerstandsfähig ist, werden die Oberflächen solcher Konstruktionen bisher in der Regel mit Kunststoffen beschichtet. Wegen der geringeren mechanischen Haltbarkeit müssen Beschichtungen jedoch regelmäßig gewartet und nach Jahren auch erneuert werden. Für Konstruktionen an die hinsichtlich der Abdichtung nur zeitlich begrenzte (z. B. 72 Stunden bei Auffangräumen oder einige Stunden bei Abfüllstationen und Produktionsstätten) Anforderungen gestellt werden, erscheint es wegen der Wirtschaftlichkeit und der Risiken, die mechanisch hochbeanspruchte Beschichtungen beinhalten, günstiger, Betonoberflächen so auszubilden, daß sie den Schutz des Bodens und der Gewässer auch ohne ergänzende Maßnahmen sicherstellen.

Betonkonstruktionen, die den Schutz von Gewässern und Grundwasser gewährleisten sollen, müssen daher unter Beachtung einer hinreichenden Rißbreitenbeschränkung bemessen werden. Die deutschen Regelwerke, insbesondere die Neufassung der DIN 1045, definieren hierzu die notwendigen konstruktiven Anforderungen. Trennrisse führen bereits bei kleinen Rißbreiten zu einer unter Umständen nur kurzzeitigen Durchlässigkeit. Das Aufbringen einer mäßigen Vorspannung hilft, die Dichtigkeit zu gewährleisten. Weitergehende Untersuchungen zur kurzzeitigen Einwirkung chemisch aggressiver Stoffe auf gerissene und ungerissene Betonoberflächen und den damit zusammenhängenden Transportphänomenen wären hilfreich und wünschenswert, konnten aber innerhalb des genehmigten Kostenrahmens nicht durchgeführt werden.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Forschungsarbeit lag daher in der Entwicklung und Überprüfung von Betonmischungen, die ein dichtes Gefüge mit hoher Beständigkeit insbesondere gegenüber der kurzzeitigen Einwirkung von chemisch aggressiven Stoffen - auch ohne zusätzliche Beschichtung - bieten und trotzdem einfach und zielsicher im Hinblick auf die angestrebte Festigkeit herzustellen sind.

Als dichtigkeitssteigernde Zusatzstoffe wurden Silica-Staub und Flugasche untersucht. Um den Einfluß der Zementart aufzuzeigen, wurde sowohl Portlandzement als auch Hochofenzement verwendet. Darüberhinaus wurde der dichtigkeitssteigernde Einfluß der Vakuumbehandlung überprüft. Als Ergebnis können folgende Hinweise zusammenfassend dargestellt werden:

- Der Einsatz von Silica-Staub und Flugasche als Betonzusatzstoffe ergibt sehr dichte Betongefüge, die bei Prüfung der Wasserundurchlässigkeit nach DIN 1048 nur einen sehr geringen Wassereintritt zulassen.
- Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde die chemische Beständigkeit beispielhaft gegenüber der Einwirkung einer 18 %igen Salzsäure geprüft. Als Maß für die Schädigung wurde der gelöste Calciumanteil bestimmt. Es zeigte sich, daß die Mischungen mit Flugasche unter der Einwirkung von Salzsäure am wenigsten geschädigt werden. Bei Verwendung von Hochofenzement ist der gelöste Calciumanteil geringfügig kleiner als bei der Mischung mit Portlandzement.
- Die Vakuumbehandlung von Betonoberflächen ist geeignet, ihre Dichtigkeit deutlich zu erhöhen. Da ein zu hoher Feinanteilgehalt die Wirkung des Druckgefälles bei der Vakuumbehandlung einschränkt, müssen Mischungen mit Zusatzstoffen auf die Vakuumbehandlung gezielt abgestimmt werden. Dies scheint für den Einsatz von Flugasche möglich. Auf die Verwendung des sehr feinen Silica-Staubes sollte jedoch in Verbindung mit der Vakuumbehandlung verzichtet werden.

- Die mechanische Widerstandsfähigkeit der untersuchten vakuumbehandelten Prüfplatten aus den Mischungen mit Zusatzstoffen ergab gemessen am Schleifverschleiß an der Böhme'schen Scheibe deutlich günstigere Werte als für die vakuumbehandelte Platte aus einer Vergleichsmischung.

Die vorliegende Forschungsarbeit hat bestätigt, daß Betonzusatzstoffe die Dichtigkeit und die Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Einwirkungen erhöhen können. Um für die Baupraxis hinreichend abgesicherte Mischungsempfehlungen geben zu können, sind jedoch noch weiterführende Forschungsarbeiten notwendig. Im Hinblick darauf scheint es möglich, die Widerstandsfähigkeit von Mischungen mit Hochofenzement und Flugasche noch weiter zu steigern, wenn es gelingt die Mischung so zu modifizieren, daß die Feinanteile bis auf ein Maß vermindert werden, an dem der Feinanteil- und Flugaschegehalt gerade noch die für eine erfolgreiche Vakuumbehandlung notwendige Anfangsporosität gewährleisten, damit über das Druckgefälle des aufgebrachten Vakuums noch eine möglichst intensive Verdichtung in den oberflächennahen Zonen erreicht werden kann. Nach den Hinweisen der vorliegenden Forschungsarbeit ist damit die chemische Widerstandsfähigkeit gegenüber wassergefährdenden Stoffen noch weiter zu erhöhen.

Die Verwendung von Silica-Staub ergab bei Säureangriff gegenüber Flugasche vergleichsweise ungünstige Ergebnisse. Für eine endgültige Bewertung sollten jedoch beide Zusatzstoffe auch noch hinsichtlich der Beständigkeit gegenüber anderen Angriffen untersucht werden.

Insgesamt ist abschließend festzustellen, daß der Einsatz dichter Betone bei zeitlich begrenzten Angriffen solcher Chemikalien vorteilhaft erscheint, gegenüber denen keine uneingeschränkte Widerstandsfähigkeit besteht. Mit gezielt abgestimmten Mischungsansätzen können die Schadensraten an Betonoberflächen bei unplanmäßigen Störfällen ebenso wie das Risiko einer Verschmutzung angrenzender Bodenschichten oder Flächen so begrenzt werden, daß bei zahlreichen Konstruktionen erhebliche Vorteile gegenüber einer dauernd vorzuhaltenden Beschichtung zu erwarten sind.

7 Literaturverzeichnis

- /1/ Backes, H.-P.:
Einfluß von Flugaschezusatz auf den Korrosionswiderstand von Zementmörteln gegenüber Kohlensäure, Abschlußbericht zu Forschungsvorhaben F 226 gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Az.: WE 318/49-2), Institut für Bauforschung, RWTH Aachen
- /2/ Efes, Y.; Lühr, H.-P.:
Bauaufsichtliche Gesichtspunkte für die Verwendung von Steinkohlenflugaschen, Beton- und Stahlbetonbau 82 (1987), H. 8, S. 219 - 224
- /3/ Grube, H.; Rechenberg, W.:
Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer, Betontechnische Berichte in beton 37, (1987), Heft 11, S. 446 - 451 und Heft 12, S. 495 - 498
- /4/ Herfurth, E.:
Mircosilica-Stäube als Betonzusatzstoff, Beton- und Stahlbetonbau 83 (1988, H. 6, S. 172 - 173
- /5/ Hilsdorf, H.K.; Günter, M.:
Dichter Beton, Literaturrecherche zum BMFT-Forschungsvorhaben: "Spätschäden an Spannbetonbauteilen - Prophylaxe, Früherkennung, Behebung", BMFT-Geschäftszeichen 521-7291-Bau 7006, Dezember 1982
- /6/ Hinrichsmeyer, K.:
Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton, Dissertation, Heft 74 der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, 1987
- /7/ Kordina, K.:
Untersuchung der Möglichkeiten des Einsatzes der Vorspannung ohne Verbund, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben gefördert aus Mitteln des Niedersächsischen Zahlenlottos, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, September 1983
- /8/ Musewald, J.:
Vakuumierung im Brückenbau, Straße und Tiefbau 38, 1984, Heft 6, Seite 18-23

- /9/ N. N.:
Katalog wassergefährdender Stoffe, Gemeinsames Ministerialblatt herausgegeben vom Bundesminister des Innern, 36. Jahrgang, 1985, S. 175 - 252
- /10/ N. N.:
Verordnung über Anlagen zum Lagern, Abfüllen und Umschlagen wassergefährdender Stoffe (Anlagenverordnung - VAWS), Niedersächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt, 39. Jahrgang, 1985, S. 83 - 93 und S. 422 - 434
- /11/ Poggenburg, W.; Schubert, I.; Uhlenberg, I.:
60.000 m³ - Trinkwasserbehälter der Stadtwerke Düsseldorf AG - Planung und Ausführung, gwf - wasser/abwasser 122 (1981) H. 10, S. 451 - 459
- /12/ Rostásy, F. S.; Ranisch, E. H.; Herschelmann, F.:
Untersuchung der Eigenschaften von Einpreßmörteln mit Zusatz von Silicastaub, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das Institut für Bautechnik, Berlin, (Geschäftszeichen: IV 1 - 5 - 433/85), Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig
- /13/ Zantz, E.
Vakuum-Beton: Eine alte Idee lebt jetzt wieder auf, Beratende Ingenieure, Heft 3, 1976
- /14/ Zimbelmann, R.:
Verwendung von Flugasche zur Betonherstellung, Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 11, 1983, S. 705 - 709
- /15/ Reuthe, D.; Peschel, H.; Raatz, G.:
Aufgaben für die Reinhaltung von Luft, Wasser und Boden, demonstriert am Beispiel Hamburg, Bauingenieur 62, 1987, S. 49-60.
- /16/ Merkblatt: Wasserundurchlässige Betonkonstruktionen (erscheint 1989), Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein
- /17/ Trost, D.; Cordes, H.; Ripphausen, B.:
Zur Wasserdurchlässigkeit von Stahlbetonbauteilen mit Trennrissen, Beton- und Stahlbetonbau 84(1989), H. 3, S. 60 - 63

